

ГАЛАКТИЧЕСКИЕ БАРЫ: ВЗГЛЯД С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ДЕЙСТВИЯ

В. Д. Зозуля

Санкт-Петербургский государственный университет

Мы перевели результаты моделирования баров в N -body экспериментах на язык переменных действия J_R , L_z и J_z . Для этого мы использовали пакет AGAMA и формализм, связанный с потенциалом Штекеля. Переменные действия считались в меняющемся неосесимметричном потенциале модели на различные моменты эволюции бара. Мы обнаружили, что на поздних стадиях эволюции бара максимальные значения J_R достигаются на его концах, после чего, при переходе к диску, J_R монотонно убывает. Что касается J_z , то максимальные значения J_z фактически очерчивают контуры В/PS балджа, наиболее толстой части бара. Такое поведение переменных действия можно использовать для тестов по выявлению особенностей бара нашей Галактики на основе данных GAIA.

GALACTIC BARS: A LOOK AT THE POINT OF VIEW OF ACTION VARIABLES

V. D. Zozulia

Saint-Petersburg State University

We have translated the results of bar modeling in N -body simulations into the language of action variables J_R , L_z and J_z . We used the AGAMA package and the formalism associated with the Stekel potential. Action variables were calculated in the changing non-axisymmetric potential of the model at different moments of the bar evolution. We found that at the later stages of the bar evolution, the maximum values of J_R are reached at its ends, after which, upon going to the disk, J_R decreases monotonically. As for J_z , the maximum values of J_z actually outline the B/PS bulge, the thickest part of the bar. Such a behavior of the action variables can be used for tests to identify the features of the bar of our Galaxy based on GAIA data.

Введение

Структура звездно-динамической системы полностью описывается фазовой плотностью, которая для равновесных систем, в свою очередь, является функцией интегралов движения. Среди интегралов движения, которые обычно используются для представления реальных и модельных галактик, выделяются переменные действия, так как их можно вычислить точно из орбит звезд или приближенно по мгновенным положениям и скоростям звезд в предположении, что потенциал может быть аппроксимирован потенциалом Штекеля [1]. Преимуществом описания динамической системы в переменных действия является то, что вместо изменяющихся координат каждой отдельной звезды фактически рассматривается орбита звезды целиком. При этом каждой орбите ставится в соответствие три интеграла движения: радиальное действие J_R , азимутальное действие J_φ (или L_z в осесимметричном случае) и вертикальное действие J_z . Такой подход упрощает выделение различных динамических подсистем в рассматриваемой системе и позволяет сделать выводы о механизмах их образования. Для данных GAIA это было сделано в работе [2], где

было показано, что в пространстве переменных действия заметны так называемые “ridges” (хребты), связанные со спиральными рукавами и баром нашей Галактики.

В данной работе рассматривается структура распределения переменных действия орбит звезд, населяющих трехмерный бар модельной галактики, потенциал которой схож с потенциалом Млечного Пути. Как известно, звездные диски подвержены различного рода неустойчивостям, в том числе изгибной неустойчивости и бароподобной неустойчивости. В результате действия такого рода неустойчивостей галактика формирует так называемый В/PS (boxy/peanut shaped) балдж — бар, выросший в вертикальном направлении. Интегралы движения и переменные действия, как правило, не сохраняются во время развития неустойчивости. Однако после прошедшей бурной эволюции система приходит в квазистационарное состояние, для которого формализм, связанный с переменными действия, можно применять даже в условиях неосесимметричного потенциала. Так, в работе [3] было показано, что для отдельных звезд вблизи коротации и внешнего резонанса Линдблада переменные действия осциллируют вокруг некоторого среднего значения. В данной работе будет исследовано, как распределены переменные действия в сформировавшемся В/PS балдже. Также будут выделены различные особенности этих распределений, которые в будущем помогут лучше понять структуру бара нашей Галактики.

Модель

Мы использовали одну из N -body моделей из [4], чтобы вычислить действия для всех звезд. Начальная равновесная модель состоит из экспоненциального диска, изотермического в вертикальном направлении, который погружен в гало темной материи. Гало моделируется самосогласованным образом. Для его описания используется сферически симметричная модель с профилем плотности, близким к профилю Наварро–Френка–Вайта [5]. Для задания начальных условий использовалась утилита `mkgalaxy` из [6].

Детали численного моделирования следующие. Мы рассматриваем динамически холодный диск со значением параметра Тоомре $Q = 1.2$ на расстоянии $R = 2R_d$, где R_d — радиальный масштаб диска. Значения размерных параметров выбирались так, чтобы модель была близка к нашей Галактике. Мы полагаем $R_d = 3.5$ кпк и $M_d = 5 \cdot 10^{10} M_\odot$, где M_d — масса диска. Тогда единица времени будет равна $t_u \approx 14$ млн лет. Параметры темного гало были выбраны так, чтобы его относительная масса в пределах четырех радиальных масштабов диска $M_h(r < 4R_d)/M_d$ была приблизительно равна 1.5. В расчетах мы используем $4kk$ частиц для диска и $4.5kk$ для гало. Эволюция модели была прослежена с помощью кода `gyrfalcon` [7] примерно до 8 млрд лет ($t = 600$).

К моменту времени $t = 100$ в системе образуется бар, амплитуда которого растет со временем, а скорость узора постепенно замедляется. К моменту $t = 200$ бар испытывает быструю потерю симметрии в вертикальном направлении (buckling), после чего симметрия восстанавливается, а у самого бара выделяется толстая внутренняя часть. При взгляде с ребра сформировавшаяся структура напоминает арахис. Подобные структуры в литературе принято называть В/PS балджами.

Переменные действия

Переменные действия J_R , L_z и J_z вычислялись с помощью пакета `AGAMA` [8]. Для этого в каждый момент времени для представления гравитационного потенциала модели мы брали те гармоники в представлении потенциала темного гало и диска, которые отвечают за осесимметричное распределение частиц галактики. Затем мы вычисляли переменные действия на ряд моментов времени, используя формализм, основанный на приближении

потенциала потенциалом штеккелевского вида [1]. Данный метод находит переменные действия намного быстрее, чем прямой. Например, чтобы численно найти значение J_R и J_z для $4kk$ частиц диска на один момент времени, нам потребовалось около 5 ч, тогда как с использованием приближения Штекеля эта процедура занимает всего 2 мин. Относительная погрешность метода по сравнению с численным в среднем составила $\sim 1\%$ при максимальном отклонении $\sim 5\%$, что согласуется с выводами из оригинальной статьи [8].

В отличие от работы [9] мы действительно вычисляли переменные действия в меняющемся потенциале галактики, а не только на начальный момент времени. Тем самым мы смогли определить, как эти величины изменяются для отдельных частиц, а также в целом проследить, как эволюционирует распределение переменных действия по галактике по мере того, как формируется бар, а в последующем и В/PS балдж. Тем самым мы смогли связать особенности в распределении переменных действия с морфологическими особенностями галактики.

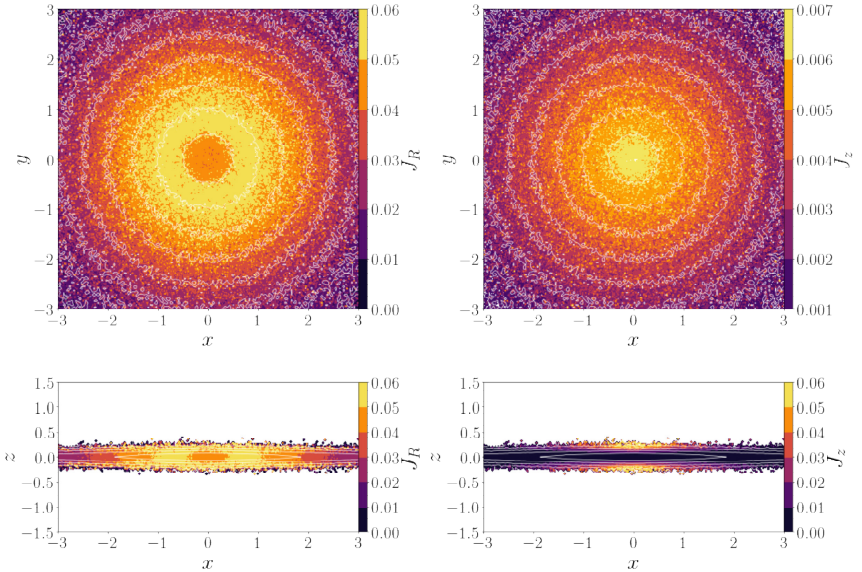


Рис. 1. Карты начального распределения действий J_R (слева) и J_z (справа). Вверху: плоскость xy ; внизу: на плоскости xz показаны средние значения переменных действия в полоске $|y| < 1$. Белые контуры — линии одинаковой поверхностной плотности

Результаты

Распределение средних значений действий J_R и J_z в проекции на плоскости xy и xz на начальный момент времени и на момент времени $t = 400$, когда сформировались и бар, и В/PS балдж, а скорость узора меняется уже медленно, приведено на рис. 1 и 2. Карты на начальный момент приведены лишь для последующего сравнения, поскольку модель неустойчива и потенциал, вплоть до формирования бара, быстро меняется. Распределение среднего значения L_z тоже строилось, но поведение этой величины предсказуемо: угловой

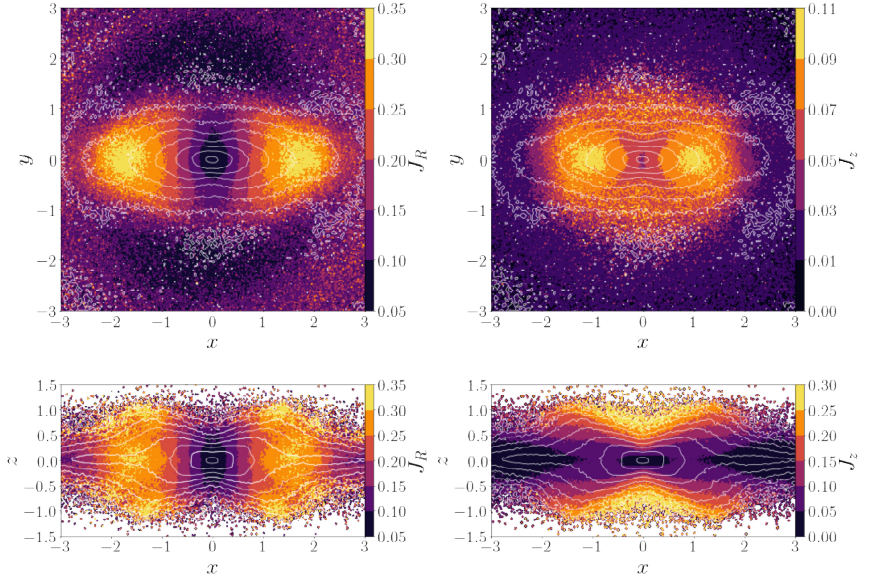


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для $t = 400$. Большая ось бара идет вдоль оси x

момент растет наружу и в начальный момент, и в последующие, поэтому карты для этой величины не приводятся. Карты J_R и J_z в начальный момент времени показывают другую тенденцию; J_R достигает пика на $R \approx 1$, а затем уменьшается к периферии. Уменьшение J_R объясняется тем, что на периферии орбиты становятся близкими к круговым. Действие J_z при $t = 0$ уменьшается от центра к периферии, при этом отличные от нуля значения J_z характерны для частиц на больших z .

При формировании бара потенциал галактики претерпевает сильные изменения, и перемешивание происходит для отдельных частиц. Изменяется и распределение их средних значений по звездному диску. При $t = 400$ средние значения J_R и J_z не просто вытягиваются вдоль большой оси бара, но их максимальные значения достигаются ближе к концам В/PS балджа (толстой части бара, см. проекцию xz на рис. 2).

При этом в проекции xz сохраняется начальная слоистая структура распределения этих величин. Значения J_R структурированы по вертикальным срезам, а значения J_z — по горизонтальным.

Наиболее интересные особенности видны на карте J_R в проекции xz . Здесь вырезана полоска $|y| < 1$. Бар практически полностью укладывается в эту полоску, и усреднение величины J_R идет по частицам бара так, что внешние части диска при этом не участвуют. Таким образом, карта J_R в проекции xz описывает вертикальную структуру бара и ее особенности. Видно, что максимумы J_R приходятся не просто на концы толстой части бара, а частично идут вдоль лучей Х-структуры — наиболее яркой части В/PS балджа.

Обсуждение и выводы

Мы связали особенности структуры бара (B/PS балджа), возникающего в N -body модели, с особенностями распределения величины J_R . Вычисление действий на основе данных GAIA сейчас стало модной темой [2, 3]. По большей части эти данные используются для поиска резонансных орбит вблизи коротации и внешнего резонанса Линдблада. Полученные нами результаты можно использовать для уточнения структуры бара нашей Галактики, а именно для выделения X-структуры на фоне различных центральных компонент и определения ее протяженности в вертикальном направлении.

Библиографические ссылки

- [1] *Binney James*. Actions for axisymmetric potentials // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2012. — Vol. 426, № 2. — P. 1324–1327. 1207.4910.
- [2] *Trick Wilma H., Coronado Johanna, Rix Hans-Walter*. The Galactic disc in action space as seen by Gaia DR2 // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — Vol. 484, № 3. — P. 3291–3306. 1805.03653.
- [3] *Trick Wilma H., Fragkoudi Francesca, Hunt Jason A. S. et al*. Identifying resonances of the Galactic bar in Gaia DR2: I. Clues from action space // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2021. — Vol. 500, № 2. — P. 2645–2665. 1906.04786.
- [4] *Smirnov Anton A., Sotnikova Natalia Ya*. What determines the flatness of X-shaped structures in edge-on galaxies? // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2018. — Vol. 481, № 3. — P. 4058–4076. 1809.06167.
- [5] *Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M.* The Structure of Cold Dark Matter Halos // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 462. — P. 563. astro-ph/9508025.
- [6] *McMillan P. J., Dehnen W.* Initial conditions for disc galaxies // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2007. — Vol. 378. — P. 541–550. astro-ph/0703534.
- [7] *Dehnen W.* A Hierarchical $O(N)$ Force Calculation Algorithm // Journal of Computational Physics. — 2002. — Vol. 179. — P. 27–42. astro-ph/0202512.
- [8] *Vasiliev Eugene*. AGAMA: action-based galaxy modelling architecture // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2019. — Vol. 482, № 2. — P. 1525–1544. 1802.08239.
- [9] *Debatista Victor P., Liddicott David J., Khachatryan Tigran, Beraldo e Silva Leandro*. Box/peanut-shaped bulges in action space // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2020. — Vol. 498, № 3. — P. 3334–3350. 1911.01084.